

Тема 8. Электрические машины постоянного тока



Вопросы темы

1. Электрические машины постоянного и переменного тока.
1. Устройство и принцип работы генератора постоянного тока.
2. ЭДС и вращающий момент генератора постоянного тока.
3. Способы возбуждения генераторов постоянного тока.
4. Принцип работы двигателя постоянного тока.
5. Способы возбуждения двигателей постоянного тока.

КЛАССИФИКАЦИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН!!!

Устройства, предназначенные для превращения механической энергии в электрическую или обратно, называются **электрическими машинами**. Машина, превращающая механическую энергию в электрическую, называется **генератором**. Когда машина превращает электрическую энергию в механическую, она называется **электродвигателем**. В зависимости от рода электрического тока, возникающего в генераторе или преобразующегося двигателем в механическую энергию, различают электрические машины постоянного и переменного тока.

1. Устройство и принцип работы генератора постоянного тока

Принцип работы генератора постоянного тока основан на возникновении ЭДС в рамке, вращающейся в магнитном поле (рис. 1).

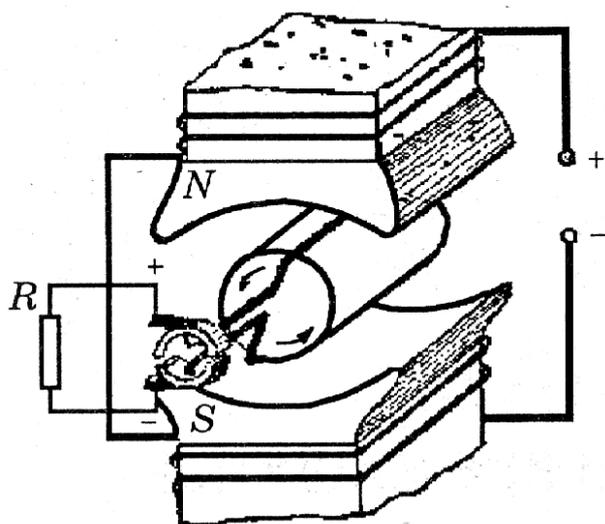


Рис. 1. Возникновение ЭДС в рамке, вращающейся в магнитном поле

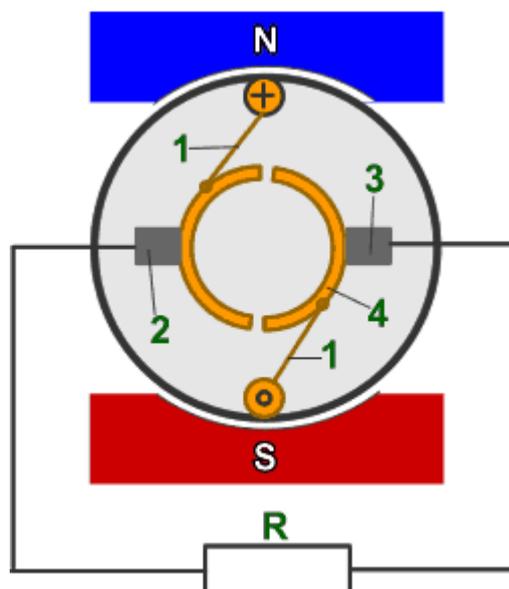


Рис. 2. Устройство коллектора

Как известно, при вращении рамки индуцируемая в ней ЭДС будет изменяться по синусоиде, т. е. за один оборот дважды поменяет знак. Чтобы ток во внешней цепи имел одно направление (постоянное), применяют **коллектор** (рис. 2) — два полукольца-пластины (4), соединенных с концами (1) рамки, которые через щетки (2, 3) соединяются с внешней цепью. Как только рамка повернется на 180° и ЭДС начнет менять знак, полукольца коллектора поменяются местами. Благодаря этому направление тока во внешней цепи останется неизменным, хотя его величина будет изменяться (пульсировать) (рис. 3).

Если поместить на якоре два витка под углом 90° один к другому и концы этих витков соединить с четырьмя коллекторными пластинами, то пульсация эдс и тока во внешней цепи значительно уменьшится. При увеличении числа коллекторных пластин пульсация быстро уменьшается и при большом числе коллекторных пластин эдс и ток практически постоянны (рис. 4).

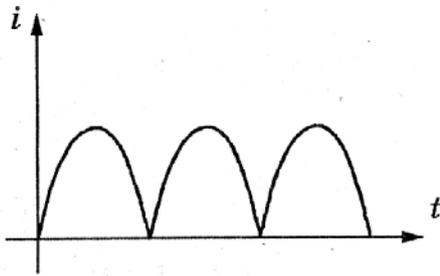


Рис. 3. Пульсации
одновиткового якоря

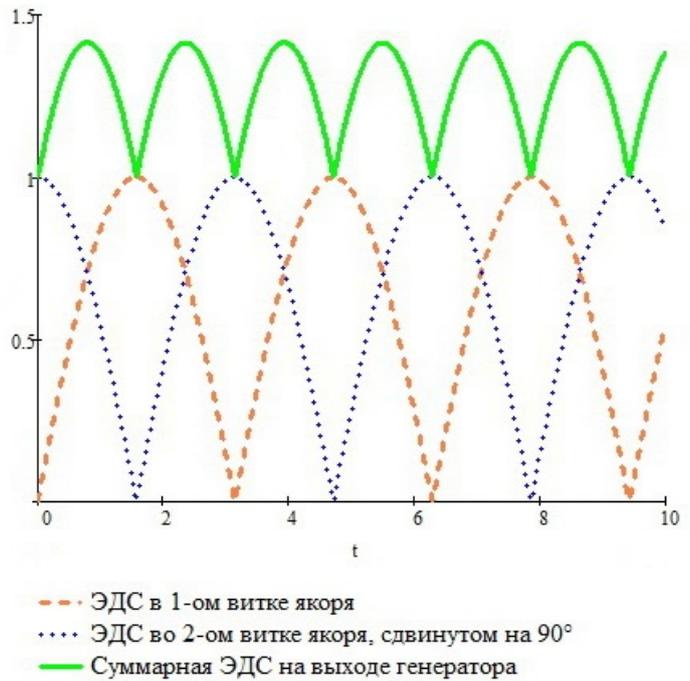


Рис. 4. Пульсации двухвиткового якоря

Машина постоянного тока состоит из неподвижной части, служащей для возбуждения главного магнитного поля, и вращающейся, в которой индуцируются ЭДС и токи, создающие тормозящий момент в генераторе и вращающий момент в двигателе.

Устройство промышленного генератора постоянного тока показано на рис. 5.

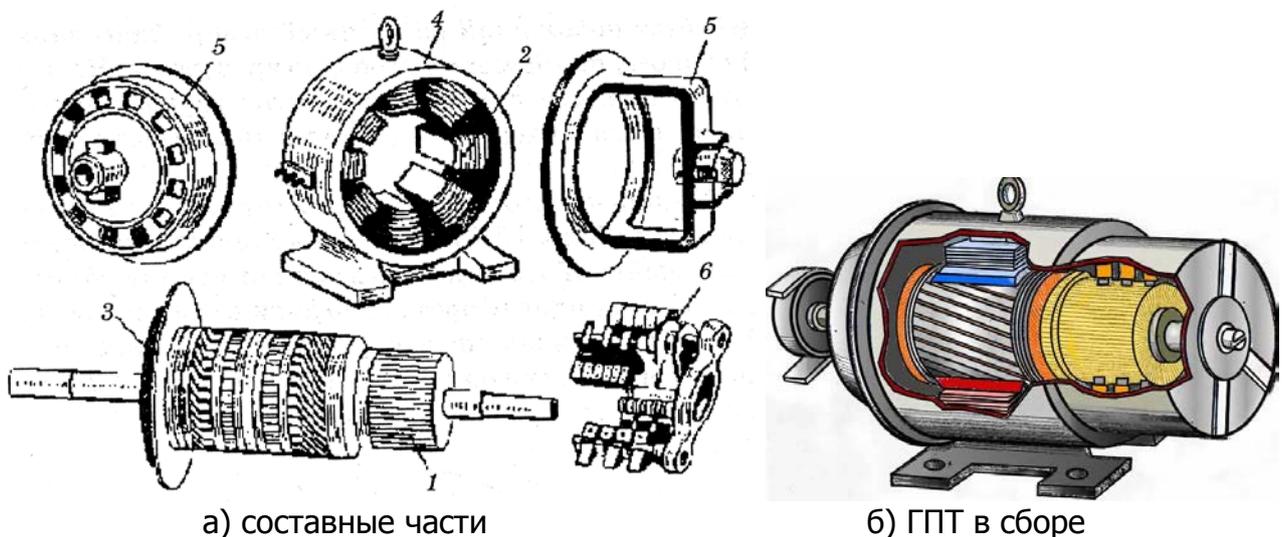


Рис. 5. Устройство ГПТ

Неподвижная часть генератора состоит из станины 4, на которой находятся главные полюсы 2 с обмотками возбуждения и дополнительные полюсы с обмотками для компенсации ЭДС самоиндукции и реакции якоря. В большинстве случаев электромагниты питаются от самого генератора. Внутри станины помещается якорь 3, представляющий собой металлический цилиндр, набранный из штампованных,

изолированных друг от друга пластин электротехнической стали. В продольных пазах на поверхности якоря размещена обмотка, состоящая из соединенных между собой секций. Для сглаживания пульсаций ЭДС и тока обмотка якоря равномерно распределена по всей поверхности. Выводы секций присоединены к изолированным друг от друга и от корпуса машины медным пластинам коллектора 1, причем конец одной секции и начало следующей присоединяют к одной и той же пластине. Коллектор жестко укреплен на валу якоря, где крепится и вентилятор. Вал якоря помещается в подшипники подшипниковых щитов 5, укрепляемых на боковых сторонах станины. Между якорем и полюсами имеется небольшой воздушный зазор, благодаря которому якорь может свободно вращаться. На цилиндрическую поверхность коллектора накладываются угольные щетки, вставленные в щеткодержатели 6.

Как и все электрические машины, машины постоянного тока **обратимы**. Машина работает в режиме генератора, если ее вращает тот или иной первичный двигатель, главное магнитное поле возбуждено, а цепь якоря замкнута через щетки на нагрузку. В этом случае в обмотке якоря индуцируется ЭДС, которая через коллектор и щетки подает ток в нагрузку. В самой машине взаимодействие тока якоря с главным магнитным полем создает тормозящий момент, который должен преодолевать первичный двигатель. Машина преобразует механическую энергию в электрическую.

Если цепи якоря и возбуждения машины присоединены к источнику электроэнергии, то в них возникают токи, взаимодействие которых создает вращающий момент. Под действием этого момента якорь начинает вращаться, и машина работает в режиме двигателя, преобразуя электрическую энергию в механическую. *Таким образом, одна и та же машина может быть использована в качестве генератора и двигателя.*

2. ЭДС и вращающий момент генератора постоянного тока

Выясним, как зависит ЭДС генератора постоянного тока от параметров машины, скорости вращения якоря и магнитного потока.

При равномерном перемещении проводника длиной l со скоростью v в магнитном поле с индукцией B (скорость перпендикулярна вектору индукции), в нем по закону электромагнитной индукции возникнет ЭДС e :

$$e = \left| -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| = \frac{Bl\Delta x}{\Delta t} = Blv. \quad (1)$$

Рассмотрим движение проводника обмотки якоря в магнитном поле под полюсом. Чтобы определить среднее значение ЭДС в этом проводнике, введем понятие средней индукции.

Допустим, что индукция равномерно распределена по всему воздушному зазору объемом V (рис.6). Тогда ее среднее значение

$$B_{cp} = \frac{\Phi}{V} = \frac{\Phi}{Sl} = \frac{\Phi}{\pi dl}, \quad (2)$$

где S — площадь поверхности якоря;

d — диаметр якоря;
 l — длина образующей цилиндра якоря.

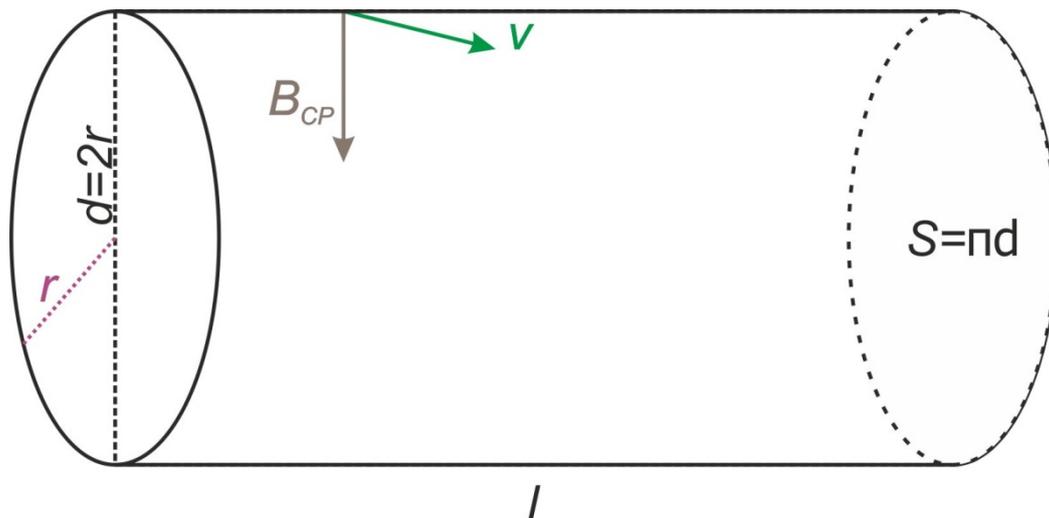


Рис. 6. Цилиндр, образуемый якорем при вращении

Предполагая, что вектор средней магнитной индукции везде направлен по радиусу якоря, т. е. перпендикулярно скорости, мы получим для средней ЭДС в одном проводнике обмотки якоря

$$e_{CP} = B_{CP}lv \quad (3)$$

где v — линейная скорость вращения проводника обмотки якоря.

Учитывая, что скорость вращения проводника обмотки якоря $v = \omega r = 2\pi n \frac{d}{2} = \pi n d$ (ω и n - угловая скорость и частота вращения якоря соответственно), и подставляя в (3) значение средней индукции (2), получим

$$e_{CP} = \frac{\Phi}{\pi dl} lv = \frac{\Phi}{\pi dl} l \pi n d = n\Phi. \quad (4)$$

Обмотка якоря состоит из N активных проводников. Щетки делят эту обмотку на $2a$ параллельных ветвей. Таким образом, в пределах каждой параллельной ветви последовательно соединяются $\frac{N}{2a}$ активных проводников. Поскольку ЭДС генератора e равна ЭДС параллельной ветви, то для нее можно записать следующее выражение:

$$e = e_{CP} \frac{N}{2a}. \quad (5)$$

Подставляя в (5) выражение для средней ЭДС (4), получим

$$e = \frac{N}{2a} n\Phi = cn\Phi . \quad (6)$$

где $c = \frac{N}{2a}$ — постоянная, зависящая только от параметров машины.

Таким образом, мы видим, что ЭДС генератора постоянного тока пропорциональна значению магнитного потока машины Φ и скорости вращения якоря n . Следовательно, для поддержания постоянного напряжения (ЭДС) на зажимах генератора можно изменять либо магнитный поток, либо скорость вращения якоря (либо и то и другое). Обычно якорь генератора приводят во вращение двигателем, работающим при определенной скорости вращения, а магнитный поток изменяют путем изменения тока в обмотке возбуждения.

Вычислим мощность генератора постоянного тока:

$$P = \frac{A}{t} \quad (7)$$

причем работой A следует считать механическую работу, затрачиваемую на преодоление тормозного момента, развиваемого якорем. В формуле (7) мощность можно выразить через линейную скорость вращения якоря:

$$P = \frac{FS}{t} = Fv , \quad (8)$$

где F - сила, действующая на якорь;

v - линейная скорость точки на поверхности якоря.

Как мы уже видели, линейная скорость проводника на поверхности якоря

$$v = \pi nd ,$$

где n - частота вращения якоря; d - диаметр якоря.

Подставляя выражение для скорости в (8), получим

$$P = F\pi nd . \quad (9)$$

На каждый проводник обмотки якоря с током I действует по закону Ампера сила $F_1 = IB_{CP}l$, а на N проводников обмотки с учетом формулы (2) будет действовать сила

$$F_{CP} = IB_{CP}l = NI \frac{\Phi}{\pi dl} l = \frac{N}{2\pi da} \Phi I_{CP} \quad (10)$$

Подставляя соотношение (10) в (9) и учитывая формулу (6), получим:

$$P = F \pi n d = \frac{N}{2\pi da} \Phi I_{CP} \cdot \pi n d = \frac{N}{2a} n \Phi I_{CP} = e I_{CP}. \quad (11)$$

Вращающий момент машины можно записать в виде

$$M = F_{CP} r = F_{CP} \frac{d}{2} = \frac{N}{2\pi da} \Phi I_{CP} \frac{d}{2} = c \Phi I_{CP}, \quad (12)$$

где $c = \frac{N}{4\pi a}$ - постоянный коэффициент, учитывающий особенности конструкции машины.

3. Способы возбуждения генераторов постоянного тока

Возбуждением генератора называется создание главного магнитного потока, благодаря которому во вращающемся якоре создается ЭДС. Важнейшим отличительным признаком машин постоянного тока является способ возбуждения главного магнитного поля. Практически во всех современных машинах главное магнитное поле возбуждается электромагнитным путем, для чего по обмотке возбуждения, размещенной на сердечниках полюсов машины, пропускается ток. Все рабочие характеристики машины постоянного тока при работе как в режиме генератора, так и двигателя зависят от способа включения цепи возбуждения по отношению к цепи якоря. Соединение этих цепей может быть параллельным, последовательным, смешанным и, наконец, цепи могут быть независимы друг от друга. При любом способе включения мощность, потребляемая цепью возбуждения, невелика и составляет несколько процентов от номинальной мощности машины.

Таблица 1. Условные графические обозначения машин постоянного тока

Машина постоянного тока с независимым возбуждением		Машина постоянного тока с параллельным возбуждением	
Машина постоянного тока с последовательным возбуждением		Машина постоянного тока со смешанным возбуждением	

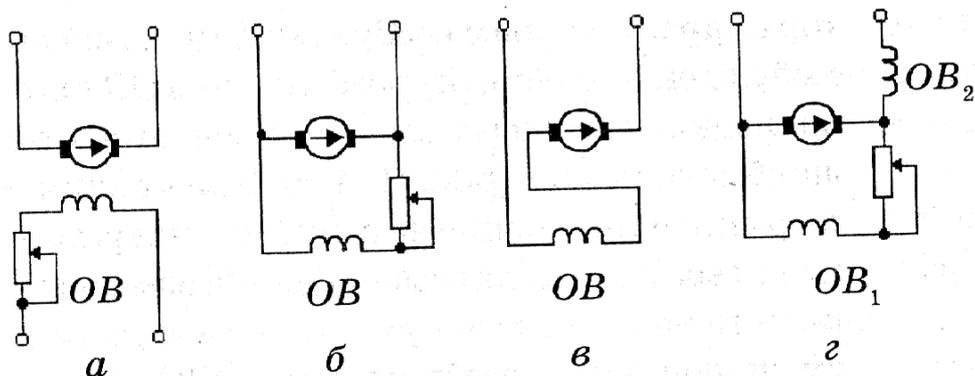


Рис. 7. Способы возбуждения ГПТ

Генератор с независимым возбуждением. Обмотка возбуждения ОВ такого генератора подключена к постороннему источнику тока через регулировочный реостат (рис. 7, а).

При увеличении тока нагрузки напряжение на зажимах этого генератора несколько уменьшается из-за падения напряжения на обмотке якоря и в результате действия реакции якоря, которая уменьшает магнитный поток машины. Для поддержания постоянного напряжения на зажимах генератора изменяют ток возбуждения с помощью регулировочного реостата. Внешняя характеристика этого генератора (зависимость напряжения на зажимах от тока нагрузки $U_H = f(I_H)$) показана на рис. 8 (кривая 1).

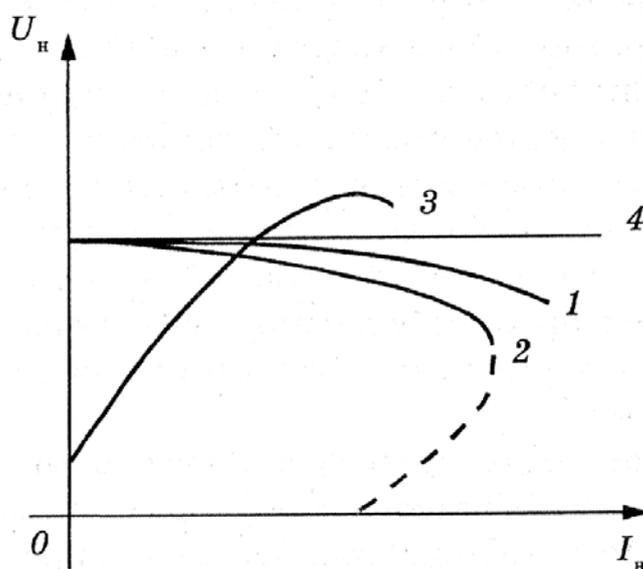


Рис. 8. Внешние характеристики ГПТ.

Генератор с параллельным возбуждением — генератор с *самовозбуждением*: обмотку возбуждения ОВ такого генератора подключают через регулировочный реостат параллельно обмотке якоря (рис. 7, б). При увеличении тока нагрузки напряжение на зажимах генератора с параллельным возбуждением уменьшается из-за падения напряжения на обмотке якоря, что, в свою очередь вызывает уменьшение тока возбуждения и ЭДС в якоре. Поэтому при увеличении тока нагрузки напряжение на зажимах генератора с параллельным возбуждением уменьшается быстрее, чем у генератора с независимым возбуждением. Дальнейшее увеличение тока нагрузки приводит к такому сильному уменьшению тока возбуждения, что при коротком замыкании цепи нагрузки напряжение генератора падает до нуля. *Поэтому короткое замыкание генератора с параллельным возбуждением опасно.* Внешняя характеристика этого генератора показана на рис. 8 (кривая 2).

Генератор с последовательным возбуждением - генератор с *самовозбуждением*, но его обмотка возбуждения ОВ включена последовательно с якорем (рис. 7, в) и по обеим обмоткам протекает одинаковый ток. При отсутствии нагрузки (внешняя цепь разомкнута) в якоре все же возбуждается небольшая ЭДС вследствие остаточной индукции стального сердечника статора. При увеличении

тока нагрузки напряжение на зажимах генератора сначала растет до тех пор, пока не наступит насыщение магнитной системы машины, после чего начинает быстро уменьшаться из-за падения напряжения на сопротивлении якоря и вследствие размагничивающего действия реакции якоря (кривая 3 на рис. 8). Ввиду сильной зависимости напряжения на зажимах генератора от нагрузки генераторы с последовательным возбуждением применяются очень редко.

Генератор со смешанным возбуждением относится к генераторам с *самовозбуждением*, но имеет две обмотки возбуждения: OB_1 , которая включается параллельно якорю, и OB_2 — последовательно с якорем (рис. 7, г). Обмотки включают так, чтобы они создавали магнитные потоки одного направления, а число витков в обмотках выбирают таким, чтобы падение напряжения на внутреннем сопротивлении генератора и ЭДС реакции якоря были бы скомпенсированы ЭДС от потока параллельной обмотки. Благодаря этому напряжение на зажимах генератора со смешанным возбуждением остается практически постоянным при изменениях нагрузки в определенных пределах (кривая 4 на рис. 8).

4. Принцип работы двигателя постоянного тока

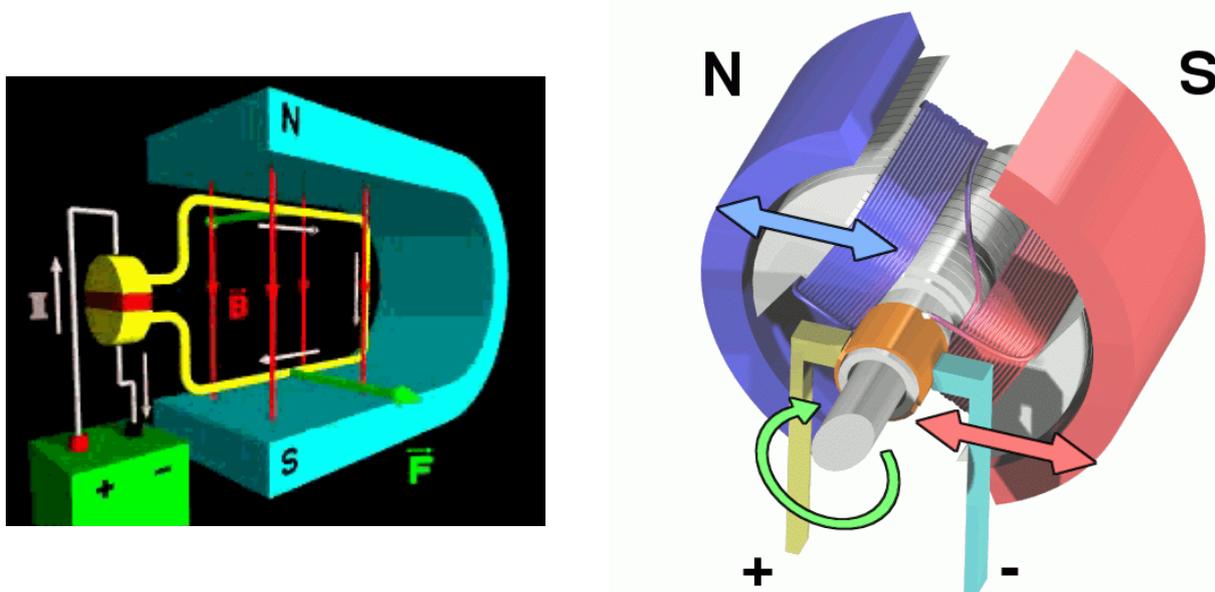


Рис. 9. Принцип работы двигателя постоянного тока

Принцип работы двигателя постоянного тока (**ДПТ**) основан на взаимодействии проводника с током с постоянным магнитным полем электромагнитов (рис. 9). Если генератор включить в сеть постоянного тока, то в обмотках якоря и электромагнитов установится ток и на каждый проводник обмотки якоря, находящийся в магнитном поле электромагнитов, начнет действовать сила, стремящаяся повернуть якорь (рис. 10, а). Из рис. 10 видно, что при изменении направления тока только в якоря (рис. 10, б) или только в обмотке возбуждения (рис. 10, в) направление вращения якоря меняется на противоположное, а одновременное изменение направления тока в обеих обмотках не изменяет направление вращения якоря (рис. 10, г). Отсюда следует, что для изменения

направления вращения двигателя постоянного тока нужно поменять местами либо концы обмотки якоря, либо концы обмотки возбуждения.

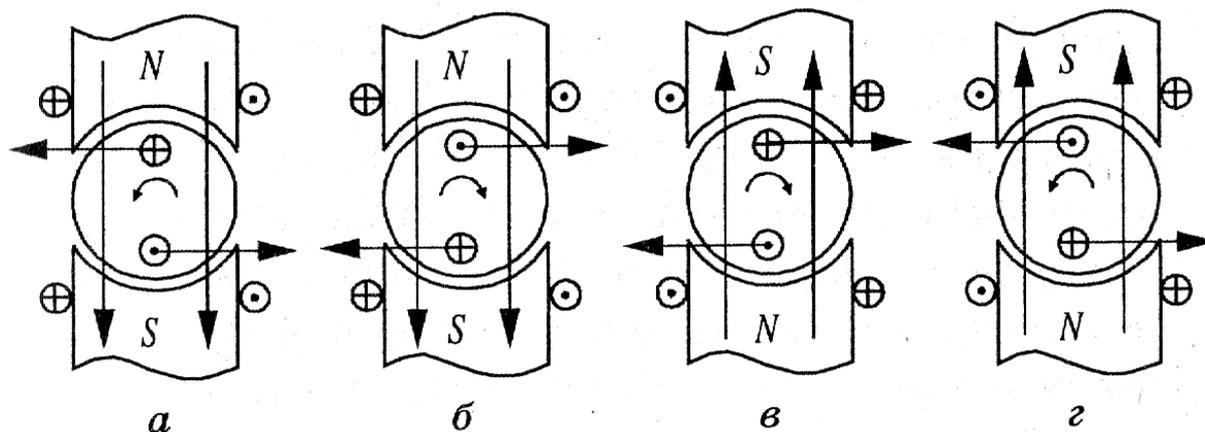


Рис. 10. К направлению вращения двигателя постоянного тока

Если двигатель постоянного тока с сопротивлением обмотки якоря $R_{я}$ включить в сеть с напряжением U , то в начальный момент пуска в ход якорь двигателя неподвижен, противо-ЭДС равна нулю, поэтому в якоре установится ток

$$I_{п} = \frac{U}{R_{я}}.$$

Поскольку сопротивление якоря мало, то пусковой ток в нем будет очень большим, превышая номинальный в десятки раз. От такого тока могут пострадать обмотка якоря, коллектор и щетки. Пусковой ток можно ограничить путем включения последовательно с обмоткой якоря пускового реостата. В этом случае пусковой ток

$$I_{п} = \frac{U}{R_{я} + R_{п}}.$$

Сопротивление пускового реостата $R_{п}$ выбирают таким, чтобы пусковой ток не превышал номинальный более чем в 1,2—1,5 раза.

В результате взаимодействия якоря с магнитным полем полюсов якорь начнет вращаться. Так как его обмотка начнет вращаться в магнитном поле, то в ней будет индуцироваться ЭДС, которая будет направлена против приложенного к двигателю напряжения. Величина этой ЭДС прямо пропорциональна числу оборотов двигателя и величине магнитного потока. Однако в отличие от генератора в двигателе эта ЭДС будет меньше приложенного от сети напряжения на величину падения напряжения в якоре машины:

$$U = e + I_{я}R_{я}, \quad (1)$$

отсюда ток в якоре при выведенном пусковом реостате

$$I_{я} = \frac{U - e}{R_{я}} \quad (2)$$

Умножив обе части уравнения (1) на $I_{я}$, получим:

$$I_{я}U = I_{я}e + I_{я}^2R_{я} \quad (3)$$

Левая часть уравнения (3) представляет собой электрическую мощность, потребляемую двигателем из сети, а второй член правой части $I_{я}^2R_{я}$ — мощность, поглощаемую сопротивлением якоря. Очевидно, что $I_{я}e$ — это полезная электрическая мощность, которая может быть преобразована в другие виды энергии. Следовательно, это та часть потребляемой из сети электрической мощности, которая преобразуется двигателем в механическую (включая механические потери). Таким образом, ЭДС самоиндукции в двигателе постоянного тока влияет на преобразование потребляемой из сети электрической энергии в механическую.

Подставим выражение для ЭДС генератора ($e = c n \Phi$) (ЭДС, индуцируемая в якоре двигателя, выражается той же формулой) в (2) и выразим скорость вращения двигателя:

$$I_{я} = \frac{U - e}{R_{я}} = \frac{U - c n \Phi}{R_{я}} \Rightarrow c n \Phi = U - I_{я}R_{я} \Rightarrow n = \frac{U - I_{я}R_{я}}{c \Phi}. \quad (4)$$

Мы видим, что скорость вращения двигателя прямо пропорциональна подводимому напряжению и обратно пропорциональна величине магнитного потока. Отсюда следует, что регулирование скорости вращения двигателя постоянного тока можно осуществлять либо изменяя сопротивление цепи якоря (при постоянном напряжении сети), либо путем изменения магнитного потока.

5. Способы возбуждения двигателей постоянного тона

Все рабочие характеристики двигателя постоянного тока, как и генератора, зависят от способа включения цепи возбуждения по отношению к цепи якоря. Соединение этих цепей может быть параллельным, последовательным, смешанным и, наконец, они могут быть независимы друг от друга.

Двигатели с параллельным и независимым возбуждением

Схема включения двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением показана на рис. 11, где ПР — пусковой, а РР — регулировочный реостат.

Если обмотку возбуждения такого двигателя подключить через регулировочный реостат РР к другому источнику постоянного напряжения, получится двигатель с независимым возбуждением.

Скоростная характеристика таких двигателей $n = f(I_{я})$ при $U = const$ и $I_{в} = const$ приведена на рис. 12.

Для объяснения ее вида обратимся к формуле (4). Изменение скорости вращения может происходить за счет изменения нагрузки и магнитного потока. Увеличение тока нагрузки незначительно изменяет внутреннее падение напряжения из-за малости сопротивления цепи якоря и поэтому лишь незначительно уменьшает скорость вращения двигателя. Что же касается магнитного потока, то вследствие реакции якоря при увеличении тока нагрузки он несколько уменьшается, что приводит к незначительному увеличению скорости вращения двигателя. Таким образом, скорость вращения двигателя с параллельным возбуждением изменяется очень мало.

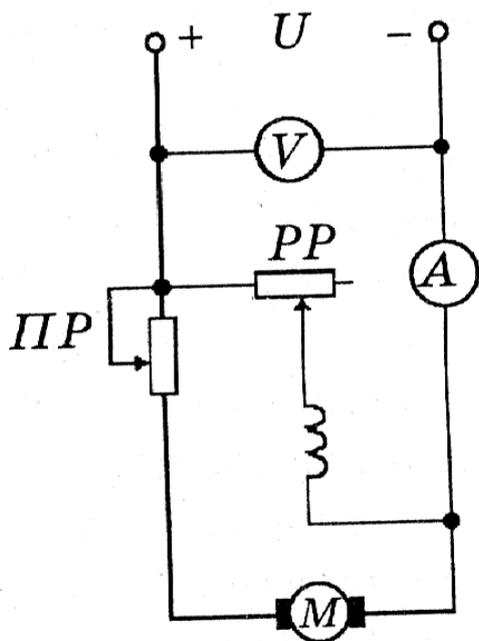


Рис. 11. Схема включения ДПТ с параллельным возбуждением

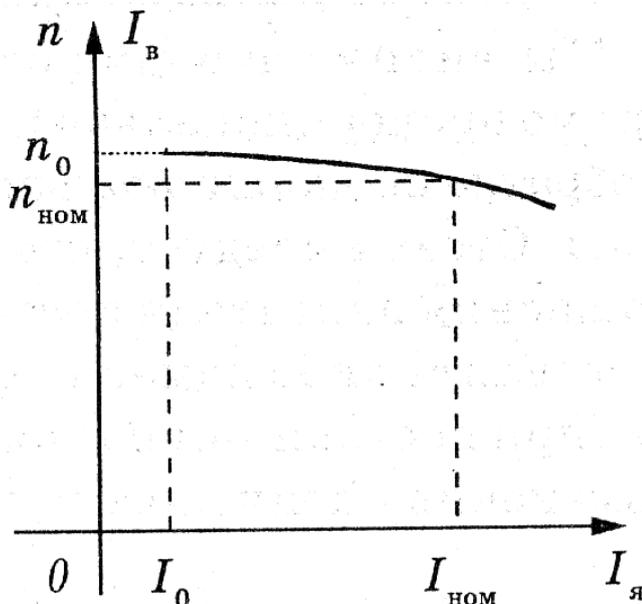


Рис. 12. Скоростная характеристика ДПТ с параллельным возбуждением

Скорость вращения двигателя с независимым возбуждением можно регулировать изменением либо сопротивления цепи якоря, либо магнитного потока. Следует отметить, что *чрезмерное уменьшение тока возбуждения и особенно случайный обрыв этой цепи очень опасны для двигателей с параллельным и независимым возбуждением, так как ток в якоря может возрасти до недопустимо больших значений.* При небольшой нагрузке (или на холостом ходу) скорость может настолько возрасти, что это станет опасным для целостности двигателя.

Двигатель с последовательным возбуждением

Схема включения двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением показана на рис. 13.

У такого двигателя ток якоря является одновременно и током возбуждения, так как обмотка возбуждения включена последовательно с якорем. Поэтому магнитный поток двигателя изменяется с изменением нагрузки. Выражение для скорости вращения двигателя последовательного возбуждения можно получить из формулы (4), заменив сопротивление якоря $R_я$ на $(R_я + R_в)$, где $R_в$ — сопротивление обмотки возбуждения:

$$n = \frac{U - I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{в}})}{c\Phi} \quad (5)$$

Скоростная характеристика двигателя последовательного возбуждения приведена на рис. 14.

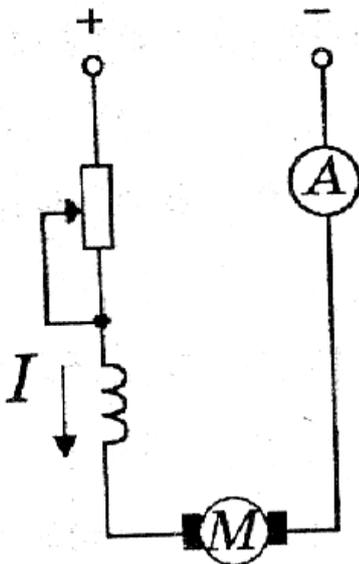


Рис. 13. Схема включения ДПТ с последовательным возбуждением

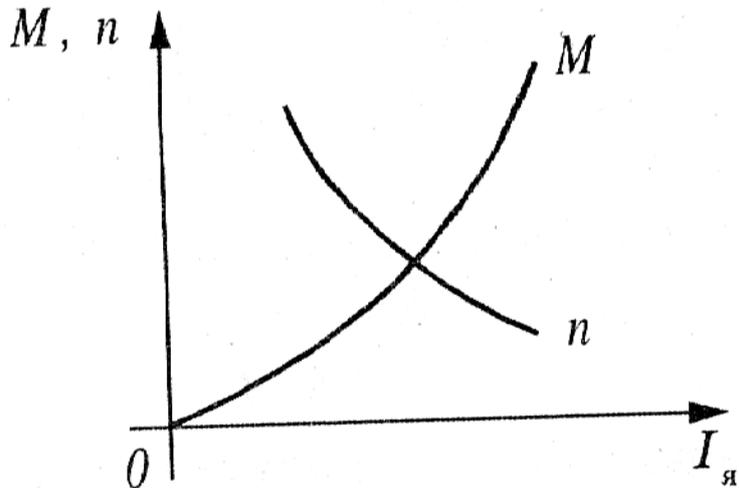


Рис. 14. Скоростная характеристика ДПТ с последовательным возбуждением

Из этой характеристики видно, что скорость двигателя сильно зависит от нагрузки. При увеличении нагрузки увеличивается падение напряжения на сопротивлении обмоток при одновременном увеличении магнитного потока, что приводит к значительному уменьшению скорости вращения двигателя. Это характерная особенность двигателя с последовательным возбуждением. *Значительное уменьшение нагрузки приводит к опасному для двигателя увеличению скорости вращения.* Поэтому такие двигатели не следует пускать вхолостую или с малой нагрузкой.

Регулирование скорости вращения двигателя с последовательным возбуждением может осуществляться путем изменения либо магнитного потока, либо напряжения питания.

Согласно формуле ($M = c\Phi I_{\text{я}}$), вращающий момент двигателя пропорционален току якоря и магнитному потоку. В свою очередь магнитный поток в отсутствие насыщения пропорционален току ($\Phi = LI$) возбуждения, который для данного двигателя является и током якоря:

$$M = c\Phi_{\text{я}} I_{\text{я}} = cI_{\text{я}}^2 \quad (6)$$

Мы видим, что вращающий момент пропорционален квадрату тока якоря. Квадратичная зависимость вращающего момента от тока нагрузки является еще одной характерной особенностью таких двигателей, благодаря которой *эти двигатели легко переносят большие кратковременные перегрузки и развивают большой пусковой момент.*

Двигатели с последовательным возбуждением применяют в тех случаях, когда необходимы большой пусковой момент или способность выдерживать кратковременные перегрузки, а также исключена возможность их полной разгрузки. Они оказались незаменимыми в качестве тяговых двигателей на электрическом транспорте (трамваи, троллейбусы, метро и электровозы), а также на подъемных кранах и для пуска двигателей внутреннего сгорания (стартеры) на автомобилях и авиационных двигателях.

ДВИГАТЕЛИ СО СМЕШАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ!!!

Вопросы для повторения

1. Изложите принцип работы генератора постоянного тока.
2. Опишите устройство промышленного генератора постоянного тока.
3. От чего зависит ЭДС и вращающий момент генератора постоянного тока?
4. Перечислите способы возбуждения генераторов постоянного тока и изобразите соответствующие схемы их включения.
5. Что такое обратимость машин постоянного тока?
6. Опишите принцип работы и устройство двигателя постоянного тока.
7. Что нужно сделать для того, чтобы поменять направление вращения двигателя постоянного тока?
8. От чего зависит скорость вращения двигателя постоянного тока и как ее можно регулировать?
9. Перечислите способы возбуждения двигателей постоянного тока и изобразите соответствующие схемы их включения.
10. Почему чрезмерное уменьшение тока возбуждения или случайный обрыв этой цепи очень опасны для двигателей с параллельным и независимым возбуждением?
11. Почему значительное уменьшение нагрузки опасно для двигателей с последовательным возбуждением?
12. Благодаря чему двигатели с последовательным возбуждением легко переносят большие кратковременные перегрузки и развивают большой пусковой момент?